T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE
İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI

SIFIR ATIK

T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE
İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI

SIFIR ATIK

SIFIR ATIK

T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE
İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI

Danışma Kurulu
Prof. Dr. Mehmet Emin BİRPINAR
Mücahit DEMİRTAŞ
Sümeyrâ M. KILINÇ
Eyyüp KARAHAN
Aytaç YÜKSEL
Prof. Dr. Osman A. ARIKAN
Prof. Dr. Sinan UYANIK
Prof. Dr. Nilgün KIRAN CILIZ

Genel Yayın Yönetmeni
Halil ERDOĞAN

Yayın Koordinatörü
Ömer Faruk LEKESİZ

Editörler
Prof. Dr. Kasım YENİGÜN
Prof. Dr. Abdulmenaf TURAN
Dr. Tuğrul ÇAMAŞ

Proje Koordinasyon
Sadiye BİLGİÇ KARABULUT
Okan BAHRİOĞLU
Oğuzhan KİPOĞLU
Uğur Şükrü BIYIKLIOĞLU
Kübranur ULUĞ

Fotoğraf
Abdülhamit TOPAL
Fatih YAZICIOĞLU
Hakan BALOĞLU

Hazırlık
Uluslararası Piri Reis Kültür Ajansı

Grafik Tasarım
Abdulsamet GÜRBÜZ
Meryem TAŞDEMİR
Çağrı ATMACA

Matbaa
İhlas Gazetecilik A.Ş.

ISBN
978-625-7076-36-4

Bu kitap, bir T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı yayını olup tüm hakları T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığına aittir.
© Eserdeki yazı, fotoğraf ve resimlerin tamamı veya bir bölümü izin alınmadan optik, elektronik veya mekanik yolla basılamaz, çoğaltılamaz.
Kitapta yer alan yazılardan ve aktarılan görüşlerden yazarlar sorumludur.

T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE
İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI

SIFIR ATIK

Editörler

Prof. Dr. Kasım YENİGÜN
Prof. Dr. Abdulmenaf TURAN
Dr. Tuğrul ÇAMAŞ

İÇİNDEKİLER

09
TAKDİM
Emine ERDOĞAN
Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanı Eşi

13
SUNUŞ
Murat KURUM
Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanı

19
ÖNSÖZ
Editörlerden

23
SIFIR ATIĞA GİDEN YOL : TÜRKİYE ÖRNEĞİ
Prof. Dr. Mehmet Emin BİRPINAR
Ersin GÜRTEPE

53
İLK İNSANDAN BUGÜNE ATTIKLARIMIZ, GELECEĞİMİZ VE DEĞER ALGILARIMIZ
Prof. Dr. Bülent ARMAĞAN

69
DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE ATIK POTANSİYELİ VE SIFIR ATIK TRENDİ
Prof. Dr. Mustafa S. YAZGAN

87
KATI ATIKLARIN KARAKTERİZASYONU VE ÖZELLİKLERİ
Prof. Dr. Osman A. ARIKAN
Dr. Hüseyin GÜVEN

103
ATIK YÖNETİMİ VE SIFIR ATIK
Doç. Dr. Mehmet Fatih DİLEKOĞLU

115

ATIK ÖNLEME VE AZALTIMI
Prof. Dr. Mehmet Sinan BİLGİLİ
Doç. Dr. Ebru AKKAYA
Prof. Dr. Ahmet DEMİR

133

DÖNGÜSEL EKONOMİYİ DESTEKLEMEK İÇİN YAPI SEKTÖRÜNDEKİ YENİDEN KULLANIM UYGULAMALARI ÜZERİNE BİR İRDELEME
Doç. Dr. Burcu SALGIN
Prof. Dr. Nilay COŞGUN

151

ESENLER GELECEĞİN ŞEHRİ: NAR İNOVASYON BÖLGESİ SIFIR ATIK HEDEFİ
Mehmet Onur SENEM
Prof. Dr. İmdat AS

175

AB YEŞİL MUTABAKATI'NDA SIFIR ATIK PROJESİ VE DÖNGÜSEL EKONOMİ MODELİ NEREDE?
Doç. Dr. Şenay BALBAY

193

DOĞA TEMELLİ BİYOLOJİK ÇÖZÜMLER, BİYOBOZUNUR UYGULAMALAR
Prof. Dr. Barış ÇALLI

209

MADEN ATIKLARINDA DÜNYADA DURUM VE YÖNETİMİ
Prof. Dr. Sinan UYANIK

227

MADEN ATIKLARI İÇİN ALTERNATİF DEPOLAMA YÖNTEMİ: ÇİMENTOLU MACUN DOLGU
Prof. Dr. Bayram ERÇIKDI
Doç. Dr. Ferdi CİHANGİR
Dr. Ercüment KOÇ

249

SIFIR ATIK İÇİN ÖNERİLER PAKETİ
Prof. Dr. Görkem AKINCI

267

SIFIR ATIK ÇALIŞMALARINDA MODERN YÖNTEMLER
Doç. Dr. Çağdaş GÖNEN

287

SIFIR ATIK MEVZUATI'NIN AVRUPA BİRLİĞİ MÜKTESABATINA UYUMU AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ
Aytaç YÜKSEL
Duygu BARUT

317

SIFIR ATIKTA SOSYOLOJİK ARKA PLAN VE TOPLUMSAL KABUL
Prof. Dr. Muammer TUNA

335

SIFIR ATIKTA FARKINDALIK: ALGI YÖNETİMİ, MEDYA VE EĞİTİM
Dr. İbrahim YENİGÜN

349

DİJİTAL ÇAĞDA SÜRDÜRÜLEBİLİR ATIK YÖNETİMİ: SIFIR ATIKTA YENİLİKÇİ YAKLAŞIMLAR VE GÜNCEL KAVRAMLAR
Prof. Dr. Bestami ÖZKAYA
Arş. Gör. Fatma Zehra ŞÜKÜR

371

SIFIR ATIK POLİTİKASININ İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ İLE MÜCADELE ÇALIŞMALARINDA VE DÖNGÜSEL EKONOMİYE GEÇİŞ SÜRECİNDEKİ ROLÜ
Eyyüp KARAHAN

385

TÜRKİYE VE SIFIR ATIK PROJESİ UYGULAMALARI: 2053 HEDEFİ
Sadiye BİLGİÇ KARABULUT

405

SIFIR ATIK YÖNETİMİNDE SERTİFİKASYON UYGULAMALARI: YASAL DÜZENLEMELER İLE TÜRKİYE ÖRNEĞİ
Prof. Dr. Nilgün KIRAN CILIZ
Merve UZUN - Cennet DEĞİRMEN
Ceyda KALIPÇIOĞLU
Prof. Dr. Mehmet Emin BİRPINAR
Eyyüp KARAHAN - Recep AKDENİZ
Sadiye B. KARABULUT - Demirhan KÜÇÜK
Hülya ÇAKIR - Mehmet BALCI



TAKDİM

Emine ERDOĞAN
Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanı Eşi

2017'de, doğanın tüm kaynaklarının, insanlığın müşterek mirası olduğu anlayışıyla, "dünya ortak evimiz" dedik ve Sıfır Atık Projesi'ni başlattık.

Atık oluşumunu azaltarak, önleyerek, oluşan atıkları kaynağında ayrıştırarak, geri dönüşümle hammadde ve enerji tasarrufu sağlayarak yaşanabilir bir dünyayı imar etme yolunda başarılı adımlar attık. Bugüne kadar geçen sürede, hedeflerimizi zamanından önce gerçekleştirmekle kalmadık, bu hedefleri aşan kazanımlar elde ettik. 2019'da, Sıfır Atık Projesi'ne, Sıfır Atık Mavi'yi ekledik. Denizlerimizi korumak ve çöplerden arındırmak için yoğun çalışmalar sürdürdük. Bugün, 531 mavi bayraklı plajımızla, dünyada üçüncü sıraya yükseldik.

İklim değişikliğiyle mücadeledeki başarılarımızla, dünyada örnek gösterilen bir ülkeyiz. BM Gıda ve Tarım Örgütünün "Sıfır Atık, Sıfır Açlık Ödülü", BM Kalkınma Programı'nın "Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları Eylem Ödülü", BM İnsan Yerleşimleri Programı'nın "Atık Alanında Akıllı Şehirler Küresel Şampiyonu Ödülü" ve Dünya Bankası tarafından ilk kez verilen "İklim ve Kalkınma Liderliği Ödülü" ülkemizin oldu.

Ne mutlu ki, dünyanın sürdürülebilir geleceğinin inşasında önemli bir aktörüz. Önümüzdeki yol haritasındaki ilk durağımız, 2023'te Sıfır Atık Projesi'ni tüm ülkede yaygın hale getirmektir. 2053'te ise, "net sıfır emisyon" hedefimizi gerçekleştirmiş bir ülke olacağız! Bu gayret, dünyanın tüm gelecek nesillerine adanmıştır.

Bugüne kadar birçok ülkeden, Sıfır Atık tecrübemizi paylaşmamız noktasında talep aldık. Sıfır Atık hareketini tüm dünyada teşvik etmeyi ve tecrübe aktarımı yapmayı önemli bir misyon olarak görüyoruz. Birleşmiş Milletler 77. Genel Kurulu esnasında, BM Genel Sekreteri Sayın Antonio

Guterres ile 'Küresel Sıfır Atık İyi Niyet Beyanı'nı imzaladık ve tüm ülkeleri imzaya davet ettik.

Sürdürülebilir atık yönetimi uygulamalarını, isteyen her ülkeyle paylaşacağımız gibi, Sıfır Atık yaklaşımının küresel çapta benimsenmesi için de çalışmalar yürüteceğiz. İnsanlık tarih boyunca krizler karşısında her zaman işbirliği ve dayanışma örnekleri göstermiştir. Sıfır Atık'ın küresel bir harekete dönüşmesinin, tarihe geçecek nitelikte bir dayanışma örneği olacağını düşünüyorum.

Tarihte her çağ, öne çıkan sorunlarıyla anılır. Sanayi Devrimi ile yaşanan dönüşüm, tabiatı maalesef ki bir yağma alanına çevirdi. Günümüzde, gücünü tüketimden alan ekonomi ve tehlike altındaki sınırlı kaynaklar, insanlığın bugünü kadar, yarınını da krize sürükleyen en temel sorun haline geldi.

İklim değişikliği ile mücadele aksiyonlarının "doğayla barışmak ve yeniden kucaklaşmak" hedefi etrafında toplanması, tabiatın insanlar tarafından bir "öteki" olarak konumlandırıldığının göstergesidir. Bu da, tüm bilimsel çalışmalarla birlikte, esaslı bir zihinsel dönüşüme ihtiyaç duyduğumuzu ifade ediyor. Dolayısıyla, döngüsel ekonomiye geçiş, tabiatla yeniden denge odaklı bir ilişki kurmamızın kapısını aralayacak.

Bu noktada, yürüttüğümüz tüm çalışmalar, medeniyetimizin tabiatla; sevgi, saygı, şefkat ve hürmet ekseninde kurduğu denge ilişkisini ihya eder niteliktedir. Çevre konularında farkındalığı yüksek, doğal kaynakları koruyacak yaşam becerilerine sahip bir nesil yetiştirmek, tüm çalışmalarımızın odak noktasını oluşturuyor. Kurduğumuz sistemler kadar, bu sistemleri sürdürülebilir kılacak genç zihinlerin, Türkiye'nin Sıfır Atık Hareketi'ni geleceğe aktaracağına yürekten inanıyorum.

Bu yolculukta takdire şayan bir emek ortaya koyan başta Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığımız olmak üzere, tüm paydaşlara can-ı gönülden teşekkür ediyorum.

Yediden yetmişe, Sıfır Atık Projesi'ne kalplerinde geniş yer açarak, kazanılan başarıların esas sahibi olan Aziz Milletimize sonsuz şükranlarımı sunuyorum.



SUNUŞ

Murat KURUM
Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanı

Gelin, bağa yeşiller kuşanan doğayı görün
Her köşede bir çiçek dükkânı açan doğayı görün
Güller gülerek sesleniyor bülbüllere: Susun, susarak doğayı görün
-Mevlânâ Celâleddîn-i Rûmî

Ortak evimiz dünyamız, havasıyla, suyuyla, toprağıyla insanlığa ve tüm canlılara binyıllardır Yüce Yaradan tarafından bahşedilmiş bir nimet ve emanettir. Kendi yaşam döngüsü ve nizamı ile her türlü insan müdahalesinin üstesinden gelebilmiş olmasına rağmen mavi gezegenimiz sanayi devriminin yıkıcı etkilerine tanık olmuş, ne yazık ki ağır bir tahribata uğramıştır. Son yüz elli yıldan beri insanoğlunun dünya ile kurduğu tüketici ve yıkıcı ilişki biçiminden dolayı hem insanlık hem de diğer bütün canlılar çok önemli bir risk ve tehdit altındadır. İçerisinden geçtiğimiz bu süreçte bir yandan dünyamızın suları ve havası kirlenirken diğer yandan en büyük zenginlik kaynaklarımız olan bitki ve canlı türleri gün geçtikçe yok olma riski ile karşı karşıyadır. Yine doğal afetler günden güne daha fazla can alırken savaşlar, çatışmalar gittikçe artmakta, azgelişmişlik, yoksulluk, kitlesel göçler ve küresel iklim krizi dünyamızın dengesini bozmaktadır. Bu gelişmelerden olumsuz yönde en çok etkilenenler ise şehirler olmaktadır.

Öyle ki; tercih ettiğimiz yaşam biçimi ve dünyada uygulanan ekonomik kalkınma modelleri artık sürdürülebilir olmaktan uzaklaşmaktadır. Gittikçe derinleşen bütün bu sorunların üstesinden gelmek zorundayız. Bir yandan küresel ısınmayı yavaşlatacak adımları atarken, diğer yandan sür-

dürülebilir kalkınmayı sağlamak elzemdir. Tam olarak bu noktada, Saygıdeğer Hanımefendi'nin himayelerinde başlattığımız ve bugün küresel bir çevre hareketine dönüşen Sıfır Atık Hareketi, bir çözüm olarak karşımızda durmaktadır. İnsanoğlunun ürettiği atık verileri bu durumu teyit etmektedir. Dünyada sadece evsel katı atık üretimi 2010 yılında kişi başına günlük ortalama 1,2 kg iken bu miktarın 2025 yılına kadar kişi başına 1,4 kg'a ve yıllık toplam evsel katı atık üretiminin 2025 yılında dünya ölçeğinde 2,2 milyar tona ulaşacağı hesaplandığında Sıfır Atık Hareketinin ne kadar önemli olduğu anlaşılacaktır.

Diğer yandan Sıfır Atık Hareketi bir yeşil çözümdür, yeşil dönüşüm felsefesidir. Yeşil dönüşüm, insan aktivitelerinin olduğu tüm alanlarda; şehircilikten sanayi üretimine, sağlıktan enerjiye, ulaşımdan lojistiğe, eğitimden tarım ve turizme kadar her alanda eş zamanlı olarak tüm dünyada uygulanmalıdır. Öncelikli çözüm ise, dünyadaki karbon emisyon miktarının tek başına % 70'ini üreten şehirlerin dönüşümünden geçmektedir. İşte Sıfır Atık, insan yaşamının ve şehirlerimizin en hızlı şekilde dönüşümünü başlatacak ve hızlandıracak en önemli uygulamaları içermektedir.

Türkiye, Cumhurbaşkanımız Sayın Recep Tayyip Erdoğan'ın liderliğinde daha adil bir dünyanın kurulması yönündeki iradelerini "Dünya Beşten Büyüktür" ilkesiyle dünya kamuoyuna ilan etmiştir. Bu iradenin içerdiği manayı en güzel şekilde harekete geçirmenin yolu da yine Sıfır Atık Projesi'nden geçmektedir. Ülkemiz, sıfır atık politikalarında dünya ülkeleri arasında ilk sıralarda yer almaktadır. İklim değişikliği gibi küresel bir sorunun çözümü konusunda önemli bir araç olarak benimsenen ve 2017 yılından bu yana büyük kazanımlar elde ettiğimiz Sıfır Atık Hareketinin küresel düzeyde bir modele dönüşüyor olması bunun en somut örneklerinden biridir. Sıfır Atık Projesi şimdiye kadar uluslararası düzeyde aldığı iki büyük ödülle birlikte kendisini tüm dünyaya ispatlamış bir harekettir.

Sayın Cumhurbaşkanımızın "Hayal, gerçeğe atılmış tohumdur." sözünü hatırda tutarak bizler için yeni bir hedef olarak belirlediği Türkiye Yüzyılı'na daha emin adımlarla ve kararlılıkla yürümekteyiz. Bu yeni dönemin kodlarını Cumhurbaşkanımızın Birleşmiş Milletler 76. Genel Kurulunda ilan ettiği Yeşil Kalkınma Devrimi ve 2053 Net Sıfır Emisyon Hedefleri kapsamında görmekteyiz. Tüm sektörlerde yeni bir üretim, şehircilik, tarım, turizm ve ulaşım politikalarının geliştirilmesi zorunluluğu ülkemizin gündemine yeni bir kalkınma modeli olarak bu şekilde girmiştir. Afetlerin yanı sıra bu modelin benimsenmiş olmasının en önemli nedenlerinden biri de küresel iklim değişikliğine uyum ve mücadele politikalarıdır. Paris İklim Anlaşmasının Gazi Meclisimiz tarafından onaylanması, Bakanlığımızın adının Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı olarak değiştirilmesi, Türkiye Çevre Ajansı'nın ve İklim Başkanlığının kurulması, atık geri dönüşüm oranının %27.2'ye çıkarılması, yutak alanları olarak Millet

Bahçelerinin ve Ekolojik Koridorların oluşturulması, şehirlerimizin planlanmasında, yapılaşmasında ve kentsel dönüşüm uygulamalarında iklim dostu şehircilik anlayışının temel bir ilke olarak benimsenmesi bu çalışmaların sadece birkaçıdır. Yine bu değerlere sahip çıkmak adına Türkiye'nin 208 farklı üniversitesinden seçilen öğrencilerden oluşan iklim elçileri ve çevre müfettişi çocuklarımızın katkısı ve Bakanlığımız tarafından yürütülen eğitim çalışmalarıyla Sıfır Atık Projesi; dünyanın geleceğine katkılar sunmaya devam etmektedir.

Yaptığımız çalışmaları, ortaya koyduğumuz hedefleri, dünyamızın geleceği adına yaktığımız umut meşalemizi atalarımızın bizlere yurt kıldığı Anadolu'dan başlayarak gönül coğrafyamıza ve dünyanın mazlum milletlerine doğru kararlılıkla yayacağız.

Biz dünyanın görmüş olduğu en büyük çevre ve şehircilik medeniyetinin mirasçıları olarak; her zaman dünyamızın ve insanlığın geleceğine yön verdik. Bugün yine aynı şekilde geliştirdiğimiz modeller ve uyguladığımız politikalarla küresel arenada sözü olan ve kabul gören bir ülke olduk. 20. yüzyılın başlarında küllerinden yeniden doğan Cumhuriyetimiz 21. Yüzyıla, Türkiye Yüzyılı'na, yön veriyor. Türkiye Yüzyılında Medeniyetimizden devraldığımız kadim kültürümüzün bütün unsurlarıyla yeni bir dünya inşa edeceğiz. Şehitlerimizin bizlere emaneti olan cennet vatanımızı taşıyla, toprağıyla, havasıyla, suyuyla, ormanıyla deniziyle, bütün canlıları ile birlikte korumak bize verilen en büyük görevdir. Bu görev ve sorumluluğun bir sonucu olan ortaya çıkan ve üç dilde hazırlanan sıfır atık kitabı, sıfır atık konusunu bütün yönleriyle ele almaktadır. Ortak evimiz dünyanın geleceğine çok önemli katkılar sunacağına inandığımı bu eserin hazırlanmasında emeği geçen herkese şükranlarımı sunuyorum.

ÖNSÖZ

Editörler

Yaşam tarzımız, kurduğumuz sosyo-ekonomik model, gündelik rutinlerimiz; bunların tamamı alışkanlıklarımız sonucu ortaya çıkan gerçeklerdir. Ancak dünyamız artık bizim alışkanlıklarımızı kaldıracak kadar sınırsız imkanlara sahip değildir. Alışkanlıklarımızı değiştirmenin, yeni bir model ve yaklaşım ortaya koymanın tam zamanıdır. Bu anlamda yeni bir ekonomi anlayışı, yeni bir model ve bir zihniyet değişimi olarak nitelendirebileceğimiz Sıfır Atık buna yönelik atılmış çok önemli bir adımdır.

Sıfır atık konusu hem dünya gündeminde hem de bu alanda son yıllarda yapılan akademik çalışmaların merkezinde yer almaktadır. Atığı değerli bir hammadde olarak gören ve gün geçtikçe kazanımları sürekli artan bu yeni yaklaşımın çok boyutlu ve disiplinlerarası bir anlayışla ele alınması gerekmektedir. Fenni bilimlerden sosyal bilimlerin neredeyse bütün alanlarına tekabül eden bu yaklaşım bugünün ve gelecekte karşılaşılması muhtemel sorunların çözümü bakımından oldukça elverişli öneriler ve araçlar sunmaktadır. Fenni bilimlerden fizik, kimya, biyoloji ve mühendislik konuya teknik açıdan yaklaşmakta iken, iktisat, yönetim, siyaset ve sosyoloji gibi sosyal bilimler de konunun kendi alanlarına ilişkin boyutlarına odaklanmaktadırlar. Ancak her bir disiplin içinde üretilen bilimsel yaklaşımlar diğer çalışmalardan elde edilen çıktıları kullanmak durumundadırlar. Son yıllarda iklim değişikliği, afet, çevre sorunları ve sıfır atık konularında üretilen bilimsel çalışmalarda bu işbirliği örneklerine daha çok rastlanmaktadır.

Sıfır atık alanında üretilen akademik çalışmaların tek başına yeterli olamayacağından bahisle bu konuda görevi ve yetkisi bulunan aktörler de sürece dahil edilmelidir. Başka bir deyişle elde edilen bilimsel verilerin uygulamaya geçmesi için bu alandaki uygulayıcı aktörler ile birlikte

hareket edilmesi gerekmektedir. Türkiye açısından değerlendirildiğinde başta Cumhurbaşkanlığı olmak üzere Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın merkez, taşra ve yurtdışı teşkilatları sorumluluk üstlenmiş durumdadırlar. Ancak bu tek başına yeterli olmayacağı için Sanayi ve Teknoloji, Bakanlığı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, İçişleri Bakanlığı, Sağlık Bakanlığı, Milli Eğitim Bakanlığı ve Ticaret Bakanlığı gibi kurumlar kimi zaman doğrudan kimi zaman da dolaylı olarak bu sürece katkı sunmaktadırlar. Yerel yönetimler ise uygulayıcı kurumlar arasında çok özel bir rol oynamaktadır. Türk yerel yönetim sisteminin en önemli aktörleri olan belediyelerin gerek kanunlarla kendilerine verilmiş olan görev ve yetkiler gerekse de bu alanda Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın destekleri ile üstlenmiş oldukları aktif rol son yıllarda daha çok dikkat çeker bir hale gelmiştir. Yine bütün bu aktörlerin aynı zamanda toplumun can damarı olan sektör temsilcileri ve sivil toplum örgütleri ile birlikte hareket etmesi büyük önem arz etmektedir.

Sayılan tüm hususların yanı sıra işbirliğini sağlayacak en önemli mekanizmalardan birisi de bilimden bilgi üretmek suretiyle ortaya konulan çalışmalardır. Sonuçları delillendirilmiş bilimsel çalışmalar; kurumlar, sektörler ve vatandaşlar için bir yol haritası görevi görmektedir. Tam da bu yaklaşıma uygun olarak sıfır atık alanında çalışmalar yapan bürokratlar, akademisyenler ve sektör temsilcilerinin yazar olarak katkı sunduğu ve Sıfır Atık konusunun bütün yönleriyle ele alındığı bu eser hazırlanmıştır. Bu eserde, sıfır atık kavramının kökenleri, ortaya çıkışı, sıfır atığın kapsamı, sıfır atık ile döngüsel ekonomi arasındaki ilişki, sıfır atık iklim değişikliği ilişkisi Türkiye'de sıfır atık hareketi ve sıfır atık projesi kapsamında yapılan çalışmalar, üretilen projeler, sıfır atık uygulamalarının farklı sektörler üzerindeki etkileri, sıfır atık konusunun sosyo-kültürel yapıdaki karşılığı ve sıfır atığın geleceği gibi konular yer almaktadır.

2017 yılında Emine Erdoğan Hanımefendi himayesinde başlatılan Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yürütülen Sıfır Atık Hareketi'nin 5. yılına atfen hazırlanan ve 21 makaleden oluşan bu çalışmayı Türkçenin yanı sıra İngilizce ve Arapça dillerinde de okuyucuların dikkatine sunuyoruz.

5 YILINDA SIFIR ATIK HAREKETİ

Büyük bir toplumsal ve ekonomik dönüşüm hareketi olarak 2017 yılında Saygıdeğer Hanımefendi Emine Erdoğan'ın himayesinde başlatılan Sıfır Atık Hareketi, beşinci yılının sonunda bir vizyona dönüşmüş, uluslararası alanda yüksek düzeyde kabul görmüş, ödüller almıştır.

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın öncülüğünde yürütülen Sıfır Atık projesi kapsamında 17.5 milyon vatandaşımıza eğitim verilmiş, bu sayede büyük bir zihniyet dönüşümü gerçekleşmiştir.

5 yıllık süre zarfında Sıfır Atık hareketi ile geri kazanım oranı %27,2'ye kadar yükselmiş, toplamda 65.2 milyar TL tasarruf elde edilmiştir. Böylece Türkiye'nin belirlemiş olduğu Yeşil Kalkınma Devrimi ve 2053 Net Sıfır Emisyon Hedefine doğru giden yolda büyük bir kazanım elde edilmiştir.

5 YILDA SIFIR ATIK KAZANIMLARI

530 milyon kwh
Enerji Tasarrufu

347 milyon adet
Kurtarılan Ağaç

572 milyon m^3
Su Tasarrufu

87 milyon adet
Varil Petrol Tasarrufu

69 milyon m^3
Depolama Alanı Tasarrufu

650 milyon ton
Hammedde Tasarrufu

3.9 milyon ton
Salınması Engellenen Sera Gazı

GERİ KAZANIM MİKTAR / ORAN

550 bin ton
Plastik Poşet

20.4 milyon ton
Kâğıt/Karton

0.5 milyon ton
Metal

5.2 milyon ton
Organik vd.

5.4 milyon ton
Plastik

2.3 milyon ton
Cam

4.2 %
Atıksu Arıtma Oranı

150 bin
Sıfır Atık Yönetim Sistemine Geçen Bina/Yerleşke Sayısı

17.5 milyon
Sıfır Atık Yönetim Sistemine Dair Eğitim Verilen Kişi Sayısı

MADEN ATIKLARI İÇİN ALTERNATİF DEPOLAMA YÖNTEMİ: ÇİMENTOLU MACUN DOLGU

Prof. Dr. Bayram ERÇIKDI
Sorumlu Yazar
Karadeniz Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü
bercikdi@ktu.edu.tr

Doç. Dr. Ferdi CİHANGİR
Karadeniz Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü

Dr. Ercüment KOÇ
Atatürk Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü

1. Giriş

Madencilik faaliyetleri sonucu açığa çıkan maden atıklarının çevreye olası etkileri nedeniyle son yıllarda madencilik faaliyetlerine karşı çevresel tepkiler giderek artmakta ve madenlerin çıkartılması ve ekonomiye kazandırılması zorlaşmaktadır. Söz konusu atıkların emniyetli ve güvenli bir şekilde yönetilmemesi durumunda, sahip oldukları kimyasal ve mineralojik bileşimlerine bağlı olarak birtakım çevresel sorunlarla karşılaşılmaktadır. Örneğin, sülfürlü minerallerin (pirit vb.) su ve oksijen varlığında oksidasyona uğraması asidik maden suyu (AMD) oluşumuna (Şekil 1), pH'ın düşmesine ve atık içerisindeki zararlı ağır metallerin çözünmesine neden olarak yeraltı ve yüzey sularının kirlenmesine neden olabilmektedir (Akçil ve Koldaş, 2006; Erçıkdı, 2009; Cihangir, 2011, Yılmaz vd., 2021, Yılmaz ve Erçıkdı, 2022; Koç vd., 2022). AMD, yüksek asidite (pH 2-3) ve yüksek konsantrasyonda demir (Fe), manganez (Mn), alüminyum (Al), çinko (Zn), bakır (Cu), nikel (Ni), kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), arsenik (As) vb. metalleri ve sülfatları içermektedir (Kuyucak, 2002). Ayrıca cevher zenginleştirme işlemleri esnasında kullanılan kimyasal maddeler, atıkların çevreye olan etkilerini çok yönlü hale getirmektedir (Çetiner vd.

2006). Bu nedenle, atıkların nereye depolanacağı, durabilitesi ve emniyeti, su ve toprak kalitesi üzerindeki etkileri vb. çevresel açıdan son derece önemlidir. Söz konusu atıklar günümüzde yerüstü atık barajlarında depolanmakta, derin denizlere deşarj edilmekte veya madeni alınmış yeraltı üretim boşluklarında dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır.



Şekil 1. Terkedilmiş Aldermac bakır çinko madeninde AMD oluşumu (Erçıkdı vd., 2017)

Derin deniz deşarj yönteminde atık bertarafı denizin yakın ve derin, yağışın çok, buharlaşmanın az olduğu bölgelerde yapılabildiğinden dolayı uygulama alanı oldukça kısıtlıdır. Ülkemizde Çayeli Bakır İşletmeleri A.Ş. cevher zenginleştirme sonucu açığa çıkan atıkların yaklaşık %45-50'sini mülga Çevre ve Orman Bakanlığı'nın onayı ile gerekli bilimsel çalışmalar, modellemeler ve testler yapılarak belirlenmiş olan Karadeniz'in 3000 m açığı ve -275 m derinliğindeki oksijensiz ve hiçbir makro yaşamın bulunmadığı ortama boru hattı ile deşarj etmektedir.

Atık barajlarında atıkların emniyetli bir şekilde depolanması ve bertaraf edilmesi dünya genelinde oldukça yaygın bir uygulamadır (Şekil 2). Dünyada 3500'den fazla atık barajı olduğu belirtilmektedir (Chambers ve Higman, 2011). Ancak dünya genelinde bugüne kadar meydana gelen 327 adet atık barajı kazası birçok kişinin hayatını kaybetmesine, yapısal hasarlara, tarım ve orman arazilerinin zarar görmesine ve olumsuz çevresel etkilere (su kirliliği vb.) neden olmuştur (Şekil 3). Meydana gelen kazalar atıkların bertarafı konusunda yeni teknolojilerin gelişimine katkıda bulunmuştur.

İlk olarak 1980 yılında Almanya'nın Bad Grund madeninde kullanılan ve başarısından dolayı dünyada giderek yaygınlaşan "macun dolgu teknolojisi" tesis atıklarının yeraltı üretim boşluklarında depolanmasına olanak sağlamaktadır (Landriault, 2006). Tesis atıklarının yeraltında depolanabilirliği atıkların karakterizasyonuna, atığın depolanacağı çevre koşullarına, kısa ve uzun dönemli duraylılık koşullarına ve reolojik özelliklere vb. bağlıdır.



Şekil 2. Gümüşhane Mastra altın tesisi (a) ve Küre flotasyon tesisi (b) atık barajları (Erçıkdı vd., 2012)

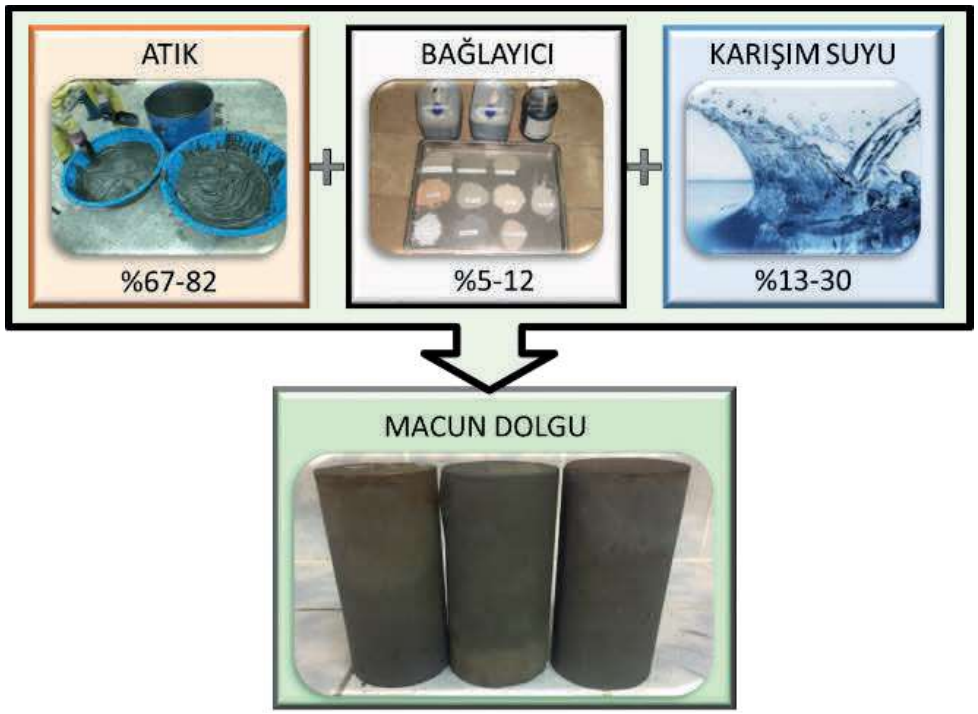


Şekil 3. Giresun Şebinkarahisar'da meydana gelen atık barajı kazası (a, b) ve tehlikeli maden atıklarının su kaynaklarına ulaşması (c,d) (URL-1, 2021)

2. Macun Dolgu Teknolojisi

Günümüzde madencilik faaliyetleri sonucu açığa çıkan cevher zenginleştirme atıkları (sülfürlü, vb.), bir miktar çimento (%2-10) ilave edilerek macun dolgu olarak yeraltı üretim boşluklarında depolanmaktadır.

Çimentolu macun dolgu yeraltında arakatlı kazı ve kes-doldur üretim yöntemlerinin kullanıldığı madenlerde uygulanabilmektedir. Çimentolu macun dolgu; cevher zenginleştirme sonucu açığa çıkan ince taneli atık, bağlayıcı ve suyun karışımından oluşan bir mühendislik ürünüdür (Şekil 4). Cevher zenginleştirme sonucu açığa çıkan atıkların %50-55'i macun dolgu olarak yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilebilmektedir.

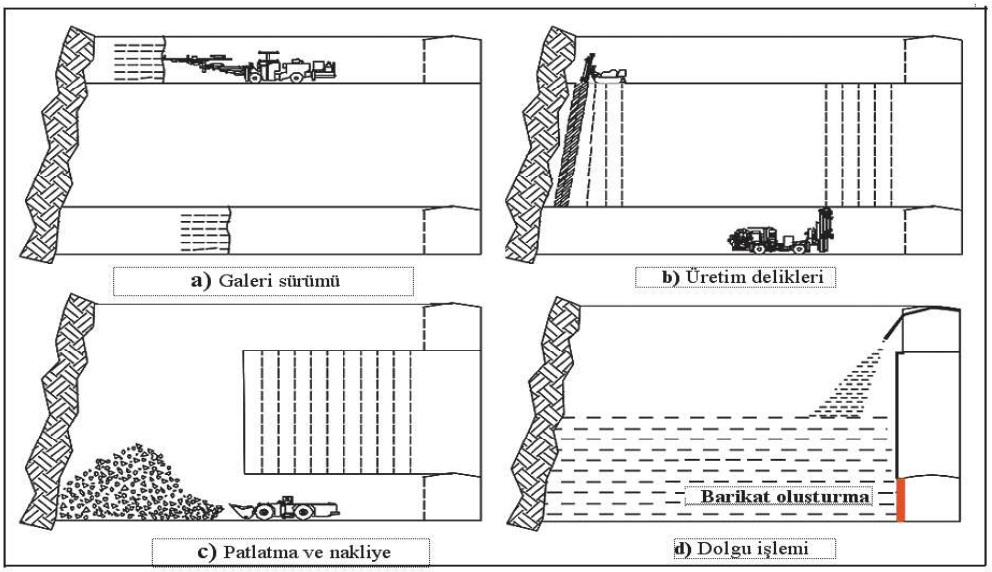


Şekil 4. Macun dolgunun şematik görünümü

Yeraltı madenciliğinde cevher üretimi sonucu oluşan boşlukların macun dolgu ile doldurulması, son yıllarda hem ülkemizde hem de dünyada giderek artmaktadır. Yumlu (2020) dünyada aktif olarak çalışan en az 400 adet macun dolgu tesisinin bulunduğunu ve 100'e yakın tesisin de proje, inşaat ve kurulum aşamasında olduğunu, Avrupa'da ise yaklaşık 17 adet macun dolgu tesisinin aktif olarak çalıştığını ve 16 tesisin de kurulum ve inşaat aşamasının devam ettiğini belirtmiştir. Ülkemizde ise Çayeli Bakır İşletmesi, Etibakır Küre ve Şirvan Bakır İşletmeleri ile Tüprag Efemçukuru Altın İşletmesi'nde uygulanmaktadır.

Yeraltında macun dolgu uygulaması genelde; yüksekliği 10-25 m, genişliği 7-15 m, uzunluğu 10-50 m arasında değişen yeraltı üretim odalarında gerçekleştirilmektedir. Yeraltında cevher üretimi ve sonrasında gerçekleştirilen macun dolgu uygulama süreçleri; a) üretim odasının tavan ve tabanında 7x5 m (genişlik x yükseklik) boyutlarında hazırlık galerile-

rinin sürülmesi, b) patlatma işlemi için üretim deliklerinin delinmesi, c) patlatma işlemi ve açığa çıkan cevherin nakliyesi ve d) barikat inşası ve madeni alınmış bölgenin dolgu malzemesi ile doldurulması safhalarından oluşmaktadır (Şekil 5).

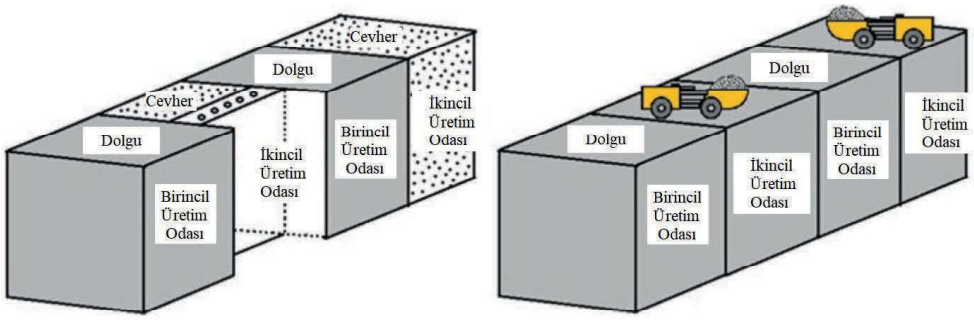


Şekil 5. Yeraltında cevher üretimi ve macun dolgu uygulama aşamaları (Erçıkdı, 2009)

Çimentolu macun dolgu teknik, ekonomik ve çevresel açıdan bazı önemli avantajlara sahiptir (Erçıkdı vd., 2017, Yumlu, 2020);

- Tesis atıklarının %50-55'inin yeraltında depolanmasını sağlar. Böylece yerüstü atık depolama ve rehabilitasyon maliyetlerini azaltır.
- Kaya ve hidrolik dolguya kıyasla macun dolgunun taşınması ve yerleştirilmesi esnasında ayrışmanın oluşmaması, yeraltı üretim boşluklarının tamamının doldurulmasına imkan sağlamakta (porozite ve boşluk oluşumu engellenmekte) ve böylece tavan oturmalarının önüne geçilerek emniyetli çalışma koşulları oluşturulmaktadır.
- Zenginleştirme işlemleri sırasında çeşitli kimyasallar ilave edilen proses suyunun yaklaşık %60-90'ı tikiner ve filtreleme işlemleri esnasında geri kazanılmaktadır.
- Macun dolgunun geçirimliliğinin düşük, doygunluk derecesinin yüksek olması hem sızıntı suyu oluşumunu hem de yeraltı suyunun dolgu içerisinden geçişini azaltmaktadır.
- Oksijenin dolgu içerisine difüzyonu ve buna bağlı olarak ortamdaki AMD üretme potansiyeline sahip minerallerin oksidasyonu, dolayısıyla AMD oluşum riski azalmaktadır.

- Boru hattı ile yeraltına taşınması, klasik taşıma sistemlerinin (konveyör ve mobil ekipmanlar) yol açtığı problemleri (tahkimatın zarar görmesi, trafik problemi vb.) azaltmaktadır.
- Dolgu işleminin hızlı olması ve aynı çimento oranında hidrolik dolguya kıyasla daha yüksek dayanım kazanımı sağlaması madencilik işlemlerinin (üretim döngü süresi) kısalmasını sağlar.
- Dolguya ilave edilen çimento dayanım kazanımının yanında dolgunun geçirimsizliğini ve nötralizasyon potansiyelini artırarak AMD oluşumunu azaltmakta/engellemektedir.
- Topukların kazanımını sağlayarak verimliliği artırır, tahkimat işlevi görür, çalışanlar ve ekipmanlar için çalışma platformu oluşturur (Şekil 6).



Şekil 6. Macun dolgunun yeraltında işlevi (Erçıkdı vd. 2017)

3. Macun Dolgu Uygulamasında Önemli Hususlar

Macun dolgu dizayn ve tasarımında en önemli parametreler dolgunun dayanım ve duraylılığı ile yeraltı su kalitesine etkisidir (Belem ve Benzaazoua, 2008). Her madenin jeolojik, hidrojeolojik, kayaç, atık vb. özellikleri farklı olduğundan, macun dolgu teknolojisini uygulayacak her bir maden için gerekli teknik koşullar laboratuvar ve yerinde jeoteknik (dayanım testleri vb.) ve jeokimyasal (statik ve kinetik testler, liç testleri vb.) deneysel çalışmalarla belirlenmelidir.

Tesis atığının macun dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesi için 20 µm altı malzeme içeriğinin ağırlıkça ≥%15 olması gerekmektedir. İnce tanelerin kolloidal su tutma özelliği dolgunun akışkan bir yapıda boru hattı ile yeraltına taşınmasına yardımcı olmaktadır.

Yan üretim odasındaki cevherin üretimi ve dolgu ile doldurulması işlemleri tamamlanıncaya kadar geçen sürede dolgunun kendi stabilitesini sağlaması gerekmektedir. Bu amaçla yerleştirilen dolgunun 28 günlük kür süresi sonunda 1 MPa dayanım kazanması ve en az 180 gün boyunca

dayanımını koruması istenmektedir. Tavan tahkimatı sağlaması amacıyla yerleştirilen dolgunun ise minimum 5 MPa dayanıma sahip olması beklenir. Dolgunun dayanım ve duraylılığı, atık, bağlayıcı ve kullanılan suyun fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri ile yakından ilişkilidir (Benzaazoua vd., 2002; Kesimal vd., 2004; Erçıkdı vd., 2009a,b, 2010, 2013). Ayrıca yeraltı kür koşulları (nem ve sıcaklık), barikatın sağlamlığı, dolgu yerleştirme şekli, yanal basınçlar ve patlatma kaynaklı titreşimler de dolgunun mekanik özelliklerini etkilemektedir. Macun dolgu uygulamasına başlanmadan önce hem maden işletmeciliği hem çevresel koşullar (su kalitesine etkisi vb.) açısından istenen dayanım ve duraylılığı sağlayan optimum dolgu dizaynı deneysel çalışmalarla belirlenmelidir (Şekil 7).



Şekil 7. Macun dolgu numunelerinin laboratuvar koşullarında hazırlanması ve testi: karıştırma (a); sıkılama (b); kür alma (c) ve UCS testi (d)

Atığın kimyasal ve mineralojik bileşimi dolgunun dayanımı açısından oldukça önemlidir. Atık bünyesindeki kil içeriğinin (≥%40) ve ince taneli malzeme miktarının (-20µm, ≥%50) yüksek olması durumunda macun

dolgunun dayanım kazanımı gecikebilir. Yüksek su tutma özelliğine sahip kil mineralleri macun dolgunun erken kür sürelerinde (özellikle 28 güne kadar) geç dayanım kazanmasına (Şekil 8a), ilerleyen kür sürelerinde ise dolgu içindeki suyun kısmen uzaklaşması ve nem içeriğinin azalması ile birlikte yüzeyde büzülme çatlaklarının oluşmasına neden olabilmektedir (Şekil 8b). Bu tür büzülme çatlakları genellikle doygun killerin ilk kuruma aşamalarında ortaya çıkmakta olup, çatlakların yoğunluğu, derinliği ve genişliği ortamda bulunan kil minerali türü ve miktarına göre farklılık arz edebilir.



Şekil 8. Kil içeriği yüksek olan macun dolu numunelerinde nem içeriğinin yüksek olması nedeniyle 28 (a) ve 360 (b) günlük kür sürelerinde numunelerde oluşan çatlaklar

Diğer taraftan atık içerisinde bulunan sülfürlü minerallerin (pirit vb.) oksidasyona uğraması durumunda da dolgu dayanım ve duraylılığı azalabilir. Çünkü piritin oksidasyonu sonucu açığa çıkan asit (H^+), hidratasyon ürünlerinin (C-S-H ve $Ca(OH)_2$) bağlayıcılık özelliklerini kaybetmelerine ($pH \leq 9,0$) neden olmaktadır. Benzer şekilde oksidasyon sonucu oluşan sülfat (SO_4^{-2}) da dolgu içerisindeki portlandit [$Ca(OH)_2$, CH] ve trikalsiyum alüminat [$3CaO.Al_2O_3$; C3A] ile reaksiyona girerek genleşme özelliğine sahip ikincil jips ($CaSO_4.2H_2O$) ve etrenjit ($3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$) minerallerinin oluşmasına yol açmaktadır. Bu mineraller içsel gerilme oluşturarak dolgunun çatlamasına neden olabilir (Benzaazoua vd., 1999, Hassani vd., 2001; Kesimal vd., 2004; Fall ve Benzaazoua, 2005; Tariq ve Nehdi, 2007; Cihangir vd., 2012, 215, 2018; Dong vd., 2019; Yin vd., 2020). Yeraltında dolgunun hemen yanında gerçekleştirilen üretim patlatmaları da çatlakların oluşmasına veya mevcut çatlakların açılmasına neden olarak dayanım ve duraylılık durumunu daha da karmaşık hale getirebilir.

Doğru bir dizaynda hazırlanmayan pirit içeriği yüksek bir macun dolgu numunesinin 28 günlük görünümü Şekil 9a'da verilmiştir. 28 günlük kür

süresinde herhangi bir oksidasyon izi ve çatlama bulunmayan numunede 360 günlük kür süresi sonunda oksidasyon nedeniyle ciddi çatlamaların olduğu görülmektedir (Şekil 9b). Numunelerde çatlamaların oluşması oksidasyonun numunenin iç kısımlarına doğru ilerlemesine neden olmaktadır (Şekil 9c). Pirit içeriği yüksek olmasına karşın dizaynı doğru yapılmış macun dolgu numuneleri ise 360 günlük kür süresi sonunda bütünlüğünü korumaktadır (Şekil 9d,e).



Şekil 9. Macun dolgunun 28 günlük kür süresi sonunda görünümü (a), dizaynı iyi yapılmamış numunede çatlamaların oluşması (b) ve oksidasyonun numunenin içerisine ilerlemesi (c), dizaynı iyi yapılmış 360 günlük numuneler (d, e) (Erçıkdı, 2009)

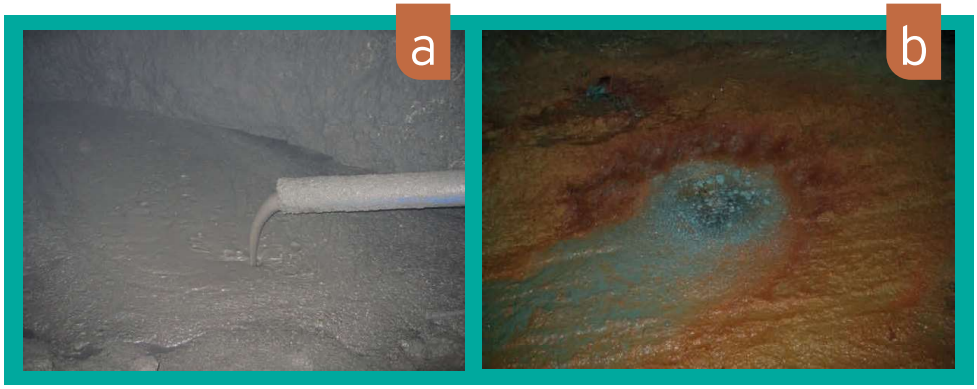
Yapılan bilimsel çalışmalar, bir macun dolgu uygulamasında yüksek dayanım ve duraylılık sağlayan bir tasarımın tüm işletmeler için genel-

leştirilemeyeceğini, her atığın farklı fiziksel, kimyasal ve mineralojik bileşime sahip olduğunu, bu nedenle dolgu dayanım ve duraylılığı açısından en uygun dolgu dizaynının (optimum bağlayıcı oranı, bağlayıcı tipi vb.) her bir atık için ayrı olarak belirlenmesi gerektiğini göstermiştir (Cihangir vd., 2012, 2015, 2018). Dizaynı doğru yapılmayan dolgu uygulaması durumunda yeraltında barikat yenilmeleri, göçük oluşumu, iş gücü kaybı, ekipman kaybı, üretimin durması ve yerüstünde tasman oluşumu söz konusu olabilir (Yumlu ve Güreşci, 2007). Uygun macun dolgu dizaynı (atığa uygun ve yeterli miktarda çimento kullanımı, ideal tane boyut dağılımı, porozite ve permeabilitesi düşük dolgu üretimi vb.) ve doğru in-situ uygulaması (sağlam barikat inşası, kontrollü patlatmalar, kademeli doldurma vb.) ile söz konusu problemler oluşmamakta ve macun dolgu teknik ve çevresel açıdan emniyetli bir şekilde yeraltında uygulanmaktadır.

4. Macun Dolgunun Su Kalitesi Etkisi

Madencilik faaliyetleri esnasında yeraltında karşılaşılan sular genellikle pompalarla yerüstüne drene edilmekte ve böylece yeraltı su tablası yapay olarak daha alt seviyelere inmektedir. Madencilik faaliyetleri yaklaşık 30 sene zaman alabilmekte ve bu süreç içerisinde macun dolgu bünyesinde bulunan sülfürlü mineraller oksidasyona uğrayabilmektedir. Maden kapandıktan sonra ise drene olayı sonlanmakta ve yeraltı su tablası doğal haline gelmektedir. Bu durumda macun dolgunun su altında kalması söz konusudur ve madencilik faaliyetleri esnasında oksidasyon nedeniyle çözünen metallerin suya karışması ve yeraltı sularının kirlenmesi söz konusu olabilir (Schafer, 2016; Bull ve Fall, 2020; Yılmaz vd., 2021, Yılmaz ve Erçıkdı, 2022) (Şekil 10a,b). Bu nedenle macun dolgu uygulamasına başlanmadan önce dolgunun su kalitesine etkisi mutlaka araştırılmalı ve su kirliliğine neden olmayacak optimum dolgu dizaynı belirlenmelidir (Cihangir vd., 2021).

Ülkemiz maden atıkları yönetmeliğine göre de madencilik faaliyetleri sonucunda oluşan yeraltı galerilerinin, maden zenginleştirme atıkları ile doldurulması işlemleri (macun dolgu vb.) için, atıkların asit maden drenajı ve uzun vadede metal liçi oluşturma potansiyelinin belirlenmesi ve işletmeci tarafından bu duruma yönelik tüm önlemlerin alındığının ortaya konulması için statik ve kinetik testler, mineralojik, jeokimyasal ve hidrojeokimyasal incelemeler hidrojeolojik incelemeler yaptırılmak zorundadır (Çevre Şehircilik Bakanlığı, 2015).



Şekil 10. Yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilen macun dolgunun yerinde taze (a) ve oksidasyona uğramış (b) görünümü

Macun dolgunun AMD oluşturma potansiyeli ve uzun dönemde zararlı ağır metal salınımı değerlendirmesi statik ve kinetik testlerle belirlenmektedir (Şekil 11). Statik ve kinetik testler macun dolgunun su kalitesine etkisinin değerlendirilmesine ve uygun dolgu dizaynının yapılmasına katkı sağlamaktadır. Statik testler, AMD üretim potansiyelinin belirlenmesinde ilk basamaktır, statik testler yardımıyla malzemenin asit üretme potansiyeli hakkında ön bilgi elde edilmektedir. Kinetik testler ise statik testlerin tamamlayıcı aşaması olarak düşünülebilir. Statik testlerden elde edilen bulguların kesinleştirilmesi ve AMD üretim mekanizmasının daha detaylı bir şekilde belirlenebilmesi açısından kinetik testlerin tatbik edilmesi önemlidir.



Şekil 11. Macun dolgunun su kalitesine etkisini araştırmak için yapılan statik ve kinetik testler (Erçıkdı vd., 2021)

Bull ve Fall (2020) madencilik faaliyetleri esnasında daha alt seviyelere inen yeraltı suyu tablasının doğal su seviyesine gelmek için yan kayaya (kırık ve çatlak içermeyen) göre daha geçirimli olan macun dolgunun içerisinden geçerek doğal yeraltı su tablası seviyesine yükseleceğini, bu durumda, macun dolgu içerisindeki ağır metallerin veya kirleticilerin suya salınma riskinin bulunduğunu ifade etmişlerdir. Benzer şekilde Chapmen vd. (2003) yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilen macun dolgunun zamanla su altında kalacağını ve su altında kaldıktan sonra dolgu içerisinde bulunan sülfürlü minerallerin oksidasyonunun ve AMD üretme potansiyellerinin sınırlanacağı/stabil kalacağı, üretim faaliyetleri esnasında ise yeraltı su seviyesinin daha alt seviyelere ineceği ve macun dolgunun otuz yıla kadar yeraltı su tablasının üzerinde kalabileceğini, bu süreçte oksijenin macun dolgu içerisine difüzyonu sonucu AMD oluşumu ve ağır metallerin çözünmesinin söz konusu olabileceğini belirtmişlerdir. Madencilik faaliyetleri sonrası yeraltı su tablasının doğal seviyesine gelmeye başlamasıyla birlikte de dolgu içerisinde çözünen metallerin ve oluşan oksidasyon ürünlerinin (H^+, SO_4^{-2}) yeraltı suyuna salınma riskinin bulunduğunu belirtmişlerdir (Chapmen vd., 2003). Macun dolgunun su kalitesine etkisini belirlemek amacıyla yapılan kinetik testlerde monolitik numune kullanımının yeraltı (in-situ) koşullarını daha iyi yansıttığı belirlenmiştir (Schafer, 2016; Erçıkdı vd., 2021).

Seipel vd. (2017) yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilen macun dolgunun yeraltında bütün halde bulunduğunu ve madencilik faaliyetleri esnasında oksidasyona uğrayabileceğini; bu nedenle macun dolgunun su kalitesine etkisinin değerlendirilmesinde bütün haldeki macun dolgu numunelerinin standart nem hücreli kinetik teste tabi tutulması gerektiğini ifade etmiştir. Araştırmacılar sülfür (S-2) içeriği %17-30 arasında değişen asit üretme potansiyeline sahip atıkları kullanarak düşük bağlayıcı oranında (%2 ve %4) hazırlanan macun dolgu numunelerini standart nem hücreli kinetik teste tabi tutmuşlardır. Seipel vd. (2017) çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan C-S-H jellerinin reaktif tanelerin yüzeyini kaplayarak sülfürlü atıkların oksidasyonunu kısmen azalttığı ancak oksidasyonu engelleyemediği ifade edilmiştir. %2 ve %4 bağlayıcı içeren macun dolgu numunelerinin sırasıyla 3. ve 10. haftalarda nem hücrelerinde bütünlüğünü kaybetmeye başladığı ve numunelerde meydana gelen ayrışma/parçalanma nedeniyle oksidasyonun şiddetinin arttığı belirtilmiştir (Şekil 12). %2 bağlayıcı içeren macun dolgudan 28 hafta boyunca As, Cr, Cu ve Ni ve %4 bağlayıcı içeren macun dolgudan Cu ve Ni salınımları, o bölgedeki içme suyu kriterlerinde izin verilen sınır değerlerden daha yüksek oranda gerçekleşmiştir. Seipel vd. (2017) su kalitesinin korunması için macun dolguya yeterli miktarda çimento ilave edilmesini önermişlerdir.

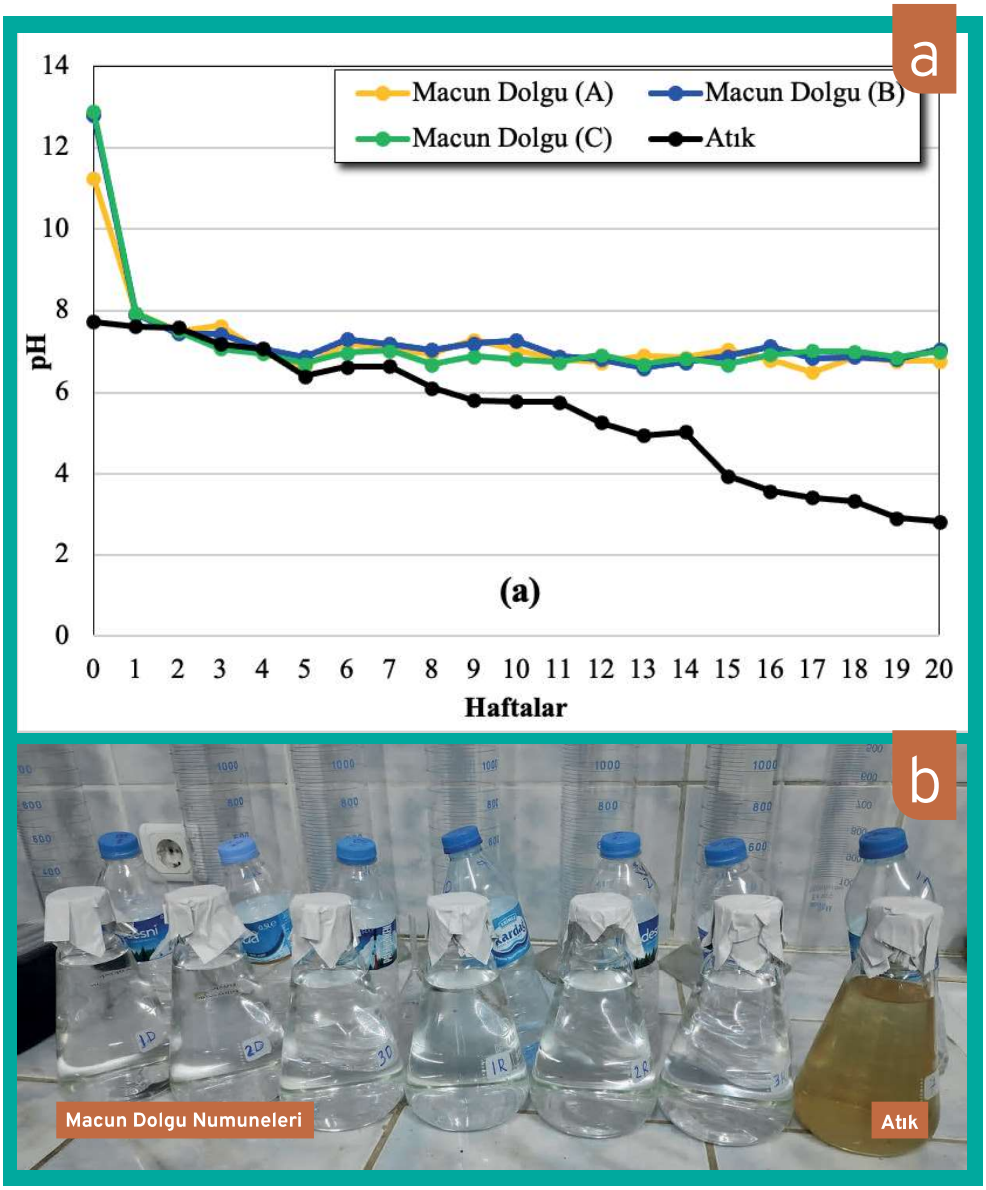


Şekil 12. Standart nem hücreli kinetik teste tabi tutulan %2 ve %4 bağlayıcı içeren macun dolgu numunelerinin 11 hafta sonundaki ayrışma/parçalanma görünümleri (Seipel vd., 2017)

Jiao vd. (2011) macun dolgu numunelerini saf su içerisinde bekleterek belirli periyotlarda (8, 30, 45, 60 ve 75 gün) dolgudan suya ağır metal (As, Pb, Cd ve Zn) salınımını gözlemlemiştir. Araştırmacılar macun dolgunun yeraltı su kalitesine olumsuz bir etkisinin olmadığını ve bu teknolojinin yeraltı madenlerinde uygulanabileceğini belirtmişlerdir. Ancak yazarların macun dolgu hazırlanmasında kullandığı atığın sülfür içeriği sadece %2'dir.

Erçıkdı vd. (2021) macun dolgunun yeraltı su kalitesine etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirdiği statik ve kinetik (40 haftalık) testlerde; i) macun dolgunun yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilen bir atık malzeme olarak değerlendirilmemesi gerektiğini, macun dolgunun çimento içeren bir mühendislik ürünü olduğunu, ii) kinetik teste tabi tutulan sülfür (S-2) içeriği yüksek (%28,7) atık malzemeye ait süzüntü suyunun 12. haftadan itibaren asidik karakter gösterdiğini (pH <5), 40. haftada pH değerinin 2,02 seviye-

sine indiği ve süzüntü suyu renginin 16. haftadan itibaren değişim gösterdiği (Şekil 13a,b), atık malzemeden salınan Al, Cd, Cu, Fe, Mn ve Zn konsantrasyonlarının TS 266 ve EPA (2009) içme suyu standartlarında belirtilen kriterlerin üzerinde gerçekleştiğini, iii) dizaynı doğru yapılmış macun dolgu numunelerine ait süzüntü sularının pH değerinin 40 hafta boyunca 6,5-8,0 aralığında değiştiği ve suların berrak renkte olduğu (Şekil 13a,b), süzüntü sularda ölçülen ağır metal (Al, Cd, Cu, Fe, Mn ve Zn) salınımlarının (Mn ve As hariç) içme suyu kriterlerinin altında olduğunu ortaya koymuşlardır.



Şekil 13. Kinetik teste tabi tutulan atık malzeme ve macun dolguya ait süzüntü suların zamana bağlı pH değişimi (a) ve suların rengi (b) (Erçıkdı vd., 2021)

5. Sonuç

Madencilik faaliyetleri sonucu yüksek miktarda atık üretilir. Son 25 yıldır bu atıkların macun dolgu olarak yeraltı üretim boşluklarında tahkimat sağlamak, güvenli çalışma koşulları oluşturmak ve atıkları depolamak amacıyla kullanımı dünya genelinde giderek artmaktadır. Macun dolguyu sadece bir atık malzemenin yeraltı üretim boşluklarında depolanması olarak tanımlamamak gerekir. Macun dolgu; atık, bağlayıcı ve suyun karışımından oluşan bir mühendislik ürünüdür maden atıkları için alternatif bir atık yönetimi yöntemidir.

Macun dolgu uygulamasında en önemli husus macun dolgunun su kalitesine olan etkisidir. Bugüne kadar yapılan bilimsel çalışmalar yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilen macun dolgunun uygun bir dizaynda hazırlanması ve yeraltı uygulamasına dikkat edilmesi durumunda macun dolgunun su kirliliğine neden olmayacağını ya da etkisinin çok düşük olacağını göstermiştir. Ancak, dizayn ve yeraltı uygulamasının uygun yapılmaması durumunda su kirliliği problemi ile karşılaşılabilir.

Macun dolgunun yeraltı üretim boşluklarında madencilik ve çevresel (su kirliliği vb.) açıdan güvenli bir şekilde uygulanabilmesi için; dolguyu oluşturan bileşenlerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri ile yeraltındaki maden işletme faaliyetleri, jeolojik, jeoteknik ve hidrojeolojik özellikler dikkate alınmalı, macun dolgu uygulamasına başlamadan önce statik ve kinetik testlerle su kalitesine etki etmeyecek en uygun dolgu dizaynı belirlenmelidir.

Macun dolgu uygulama esnasında ise macun dolgu tesisinde üretilen dolgudan ve yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilen dolgudan düzenli karot numuneler alınarak dolgu kalitesi düzenli bir şekilde izlenmeli, macun dolgunun yeraltı koşullarında uzun süre oksidasyona maruz kalma süresi (nem ve hava ile teması) engellenmeli/azaltılmalı, patlatmaların kontrollü bir şekilde yapılması sağlanmalı ve galerilerden ve gözlem kuyularından alınacak örnekler üzerinde su kalitesi periyodik olarak izlenmelidir. Yeraltında macun dolgu uygulaması öncesi mevcut su kalitesi macun dolgu uygulaması sonucu bozulmamalı ve su kalitesi korunmalıdır.

Son yıllarda ülkemizde atık barajlarında yaşanan sorunlar (atık barajı kazası vb.) dikkate alındığında, macun dolgu teknolojisinin doğru uygulama ile ülkemiz yeraltı madenciliğinde kullanımının yaygınlaştırılması, madenlerimizin çıkartılarak ekonomiye kazandırılmasına ve maden atıklarının yönetimi konusunda ülkemiz madenciliğinin karşılaştığı sorunlara çözüm sağlayacağı düşünülmektedir.

Kaynakça

1. Akçil, A. ve Koldaş, S., 2006. Acid Mine Drainage (AMD): Causes, Treatment and Case Studies. J. Of Cleaner Production, 14 (12-13), s. 1139-1145.
2. Belem, T. ve Benzaazoua, M., 2008. Design and Application of Underground Mine Paste Backfill Technology. Geotechnical and Geological Engineering, 26, s. 147-174.
3. Benzaazoua, M., Ouellet, J., Servant, S., Newman P. and Verburg, R., 1999. Cementitious Backfill with High Sulfur Content: Physical, Chemical, and Mineralogical Characterization, Cement and Concrete Research, 29, 5, p. 719-725.
4. Benzaazoua, M., Belem, T., Bussiere, B., 2002. Chemical Factors That Influence the Performance of Mine Sulphidic Paste Backfill. Cement and Concrete Research, 32 (7), s. 1133-1144.
5. Bull, A.J., Fall, M., 2020. Thermally Induced Changes in Metalloid Leachability of Cemented Paste Backfill that Contains Blast Furnace Slag, Minerals Engineering, 156, 106520.
6. Chambers, D.M. ve Higman, B., 2011. Long Term Risks of Tailings Dam Failure. Center for Science in Public Participation. Report, 34s.
7. Cihangir, F. 2011. Aktifleştirilmiş Yüksek Fırın Cürufunun Macun Dolguda Bağlayıcı Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 181 s, Trabzon.
8. Cihangir, F., Erçıkdı, B., Kesimal, A., Turan, A., Deveci, H., 2012. Utilisation of Alkali-Activated Blast Furnace Slag in Paste Backfill of High-Sulphide Mill Tailings: Effect of Binder Type and Dosage. Minerals Engineering, 30, s. 33-43.
9. Cihangir, F., Erçıkdı, B., Kesimal, A., Deveci, H., Erdemir, F., 2015. Paste Backfill of High-Sulphide Mill Tailings Using Alkali-Activated Blast Furnace Slag: Effect of Activator Nature, Concentration and Slag Properties, Minerals Engineering, 83: 117-127.
10. Cihangir, F., Erçıkdı, B., Kesimal, A., Ocak, S., Akyol, Y., 2018. Effect of Sodium-Silicate Modulus on the Strength and Microstructural Properties of Full and Coarse Sulphidic Tailings Paste Backfill, Construction and Building Materials, 185, 555-566.
11. Cihangir, F., Erçıkdı, B., Kesimal, A., Bulut, V.N., Koç, E., 2021. Yeraltı Madenciliğinde Uygulanan Sülfürlü Atıklardan Hazırlanan Çimentolu Macun Dolgunun Yeraltındaki Jeokimyasal Davranışının Belirlenmesine Yönelik Temsili Bir Metod Yaklaşımı, TÜBİTAK 1001 Projesi, 120M534, (devam ediyor).
12. Chapman, J., Hockley, D., Sexsmith, K., Arthur, B., Donahue, S., 2003. Testing Acid Generation in Cemented Paste Backfill, Proceedings from the 6th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD 2003), Cairns Australia, s. 863-867.
13. Çetiner, E.G., Ünver, B., Hindistan, M.A., 2006. Maden Atıkları ile İlgili Mevzuat: Avrupa Birliği ve Türkiye. Madencilik, 45 (1), s. 23-34.

14. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2015b). "Maden Atıkları Yönetmeliği". http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2015/07/20150715-3.htm ... Son erişim tarihi: 28 Temmuz 2022.

15. Dong, Q., Liang, B., Jia, L., Jiang, L., 2019. Effect of sulfide on the long-term strength of lead-zinc tailings cemented paste backfill, Construction and Building Materials, 200, 436-446.

16. EPA, 2009. National Primary Drinking Water Regulations. https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-06/documents/npwdr_complete_table.pdf. Accessed 28.July.2022 14:50 PM.

17. Erçıkdı, B. 2009. Mineral ve Kimyasal Katkı Maddelerinin Macun Dolgu Performansına Etkisi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 128 s, Trabzon.

18. Erçıkdı, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H., Alp, İ., 2009a. Utilization of Industrial Waste Products as Pozzolanic Material in Cemented Paste Backfill of High Sulphide Mill Tailings. J. of Hazardous Materials, 168 (2-3), s. 848-856.

19. Erçıkdı, B., Kesimal, A., Cihangir, F., Deveci, H., Alp, İ., 2009b. Cemented Paste Backfill of Sulphide-Rich Tailings: Importance of Binder Type and Dosage. Cement & Concrete Composites, 31 (4), s. 268-274.

20. Erçıkdı, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H., Alp, İ., 2010 Utilization of Water-Reducing Admixtures in Cemented Paste Backfill of Sulphide-Rich Mill Tailings. J. of Hazardous Materials, 179, s. 940-946.

21. Erçıkdı, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H. 2012. Tesis Atıklarının Yönetiminde Macun Dolgu Teknolojisi, Madencilik Türkiye, 24, 54-59.

22. Erçıkdı, B., Baki, H. and İzki, M., 2013. Effect of Desliming of Sulphide-Rich Mill Tailings on the Long-Term Strength of Cemented Paste Backfill, Journal of Environmental Management, 115, . 5-13.

23. Erçıkdı, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H., 2017. Practical Importance of Tailings for Cemented Paste Backfill. Paste Tailings Management. Editörler: Yilmaz, E. ve Fall, M. Cham/ Switzerland: Springer International Publishing, s. 7-32.

24. Erçıkdı, B., Deveci, H., Cihangir, F., Koç, E., 2021. Sülfür İçeriği Yüksek Atıklardan Hazırlanan Çimentolu Macun Dolgunun Su Kalitesine Etkisinin Statik Ve Kinetik Testlerle Araştırılması, TÜBİTAK 1001 Projesi, 118M505, 95 s.

25. Fall, M., Benzaazoua, M., 2005. Modeling the Effect of Sulphate on Strength Development of Paste Backfill and Binder Mixture Optimization, Cement and Concrete Research, 35, 301-314.

26. Hassani, F. P., Ouellet, J. and Hossein, M., 2001. Strength Development in Underground High Sulphate Paste Backfill Operation, CIM Bulletin, 94, 1050, p. 57-62.

27. Jiao, H., Wu, A., Wang, H., Yang, S., Li, R., Xiao, Y. 2011. The influence Of Cemented Paste Backfill On Groundwater Quality, Procedia Earth and Planetary Science, 2, 183–188.

28. Kesimal, A., Yılmaz, E., Erçıkdı, B., 2004. Evaluation of Paste Backfill Test Results Obtained from Different Size Slumps with Varying Cement Contents for Sulphure Rich Mill Tailings. Cement and Concrete Research, 34, s. 1817-1822.

29. Koç, E., Cihangir, F., Erçıkdı, B., 2022. Geochemical Evaluation of Sulphidic Tailings and Cemented Paste Backfill with Respect to Environmental Impacts, Managing Mining and Minerals Processing Wastes: Concepts, Design and Applications, (Baskıda).

30. Kuyucak, N., 2002. Acid Mine Drainage Prevention and Control Options, CIM Bulletin, 96-102.

31. Landriault, D., 2006. They Said It Will Never Work- 25 Years of Paste Backfill 1981-2006. Proceedings of 9th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Limerick, Ireland, s. 277-292.

32. Schafer, W., 2016. Geochemical Evaluation of Cemented Paste Tailings in a Flooded Underground Mine, IMWA 2016 – Mining Meets Water – Conflicts and Solutions, s. 714-724, Freiberg, Germany.

33. Seipel,.K. S., Sheumaker D.L., Kirk L.B, 2017. Kinetic Tests of Non-Amended and Cemented Paste Tailings Geochemistry in Subaqueous and Subaerial Settings, IMWA-2017, Mine Water and Circular Economy, s. 830-835, Lappeenranta, Finland.

34. Tariq, A. ve Nehdi, M., 2007. Developing Durable Paste Backfill From Sulphidic Tailings. Waste and Resource Management, 160 (4), s. 155-166.

35. TS 266, 2005. İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik, T.C. Sağlık Bakanlığı, Ankara.

36. URL-1, https://m.youtube.com/watch?v=6A8I6Oi_Feg

37. Yılmaz, T., Erçıkdı, B., Deveci, H., 2021. Evaluation of Geochemical Behaviour of Flooded Cemented Paste Backfill of Sulphide-Rich Tailings by Dynamic-Tank Leaching Test, International Journal of Mining, Reclamation and Environment, DOI: 10.1080/17480930.2020.1829778.

38. Yılmaz, T., Erçıkdı, B., 2022. Effect of Construction and Demolition Waste on the Long-Term Geo-Environmental Behaviour of Cemented Paste Backfill, International Journal of Environmental Science and Technology, DOI: 10.1007/s13762-021-03359-2

39. Yin, S., Shao, Y., Wu, A., Wang, Z., Yang, L., 2020. Assessment of Expansion and Strength Properties of Sulfidic Cemented Paste Backfill Cored from Deep Underground Stopes, Construction and Building Materials, 230, 116983.

40. Yumlu, M. ve Güreşci, M., 2007. Paste Backfill Bulkhead Monitoring-A Case Study From Inmet's Cayeli Mine, 9th International Symposium on Mining with Backfill, Minefill 2007, Montreal, Canada, 8 p.

41. Yumlu, M., 2020. Macun Dolgu Metoduna İlişkin Genel Çerçeve ve Uluslararası Uygulamalar, Macun Dolgu Tahkimat Sisteminin Teknik, Çevresel ve Mevzuat Açısından Değerlendirilmesi Çalıştayı, Türkiye Madenciler Derneği, 26 Ağustos 2020, Ankara.



